

Qualifizierung des UniBw Schutzkonzeptes in verschiedenen Räumen des Obermenzinger Gymnasiums

Christian J. Kähler, Thomas Fuchs, Rainer Hain
Universität der Bundeswehr München
Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

1. Einleitung

Seit vielen Monaten wird öffentlich sehr kontrovers diskutiert, ob die in der Erwachsenenwelt längst etablierten Schutzwände und mobilen Luftreiniger auch in Schulklassen installiert werden sollten oder nicht. Die Deutsche Physikalische Gesellschaft hat kürzlich in einem offenen Brief klargestellt, dass nur mit einer maschinellen Lüftung ein hohes Maß an Sicherheit vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion realisiert werden kann [1]. Ferner hat sie auf die Bedeutung von Schutzwänden zur Reduzierung der direkten Infektionen hingewiesen und auf deren Installation in Schulen gedrungen [2]. In vielen Arbeitsbereichen der Privatwirtschaft, aber auch in öffentlichen Einrichtungen und Behörden, sowie vielen Landesparlamenten und Gerichtssälen sind transparente Schutzwände inzwischen allgegenwärtig. Mobile Luftreiniger mit Filtern der Klasse H13 / H14, die mindestens das 6-fache des Raumvolumens pro Stunde filtern, werden in vielen Bereichen eingesetzt, in denen keine ausreichende Virenreduktion durch raumlufttechnische (RLT) Anlagen realisiert werden können. In den Klassenzimmern wird die flächendeckende Einführung dieser Schutzmaßnahmen hingegen mit wechselnden Argumenten von den Regierenden mit Verweis auf die Handreichung „Lüften an Schulen“ vom Umweltbundesamt (UBA) verhindert [3]. Die Hintergründe für diese Taktik lassen sich nur erahnen <https://www.news4teachers.de/2021/02/der-luftfilter-skandal-wie-bundesbildungsministerium-und-umweltbundesamt-den-einsatz-der-geraete-in-schulen-schlechttreden-und-was-dahinter-steckt/>.

Das UBA empfiehlt lediglich alle 20 Minuten alle vorhandenen Fenster in den Klassenräumen für 3–5 Minuten weit zu öffnen und über die gesamte Pausenlänge hinweg. Das Ziel der Maßnahme besteht laut UBA darin, die Luft 3 Mal pro Stunde komplett auszutauschen [3]. Dass sich mit dieser Lüftungsmethodik wirklich das Ziel erreichen lässt wurde nie wissenschaftlich nachgewiesen. Es gibt auch keinerlei Evidenz, inwieweit das Konzept des UBA überhaupt Infektionen in Klassenräumen verhindert, denn Lüften verringert allenfalls das indirekte Infektionsrisiko, das durch eine hohe Virenlast im Raum entsteht. Das viel gefährlichere direkte Infektionsrisiko, das immer dann besteht, wenn Personen dicht beisammen sind und die ausgeatmete Virenlast direkt von einer benachbarten Person eingeatmet werden kann, wie im

Kassenraum, kann mit den Lüften überhaupt nicht verhindert werden. Warum 3 Luftwechsel pro Stunde ausreichen sollten wird auch nicht wissenschaftlich begründet. Es wird behauptet, dass 3 Luftwechsel mit der Fensterlüftung einer 6-fachen Filterung der Raumluft äquivalent sein soll. Das ist aber falsch, denn in beiden Fällen beruht die Reduktion der Viren auf der Mischlüftung. Lediglich wenn die Querlüftung genutzt wird, würde es einen Unterschied geben, da dann die Verdrängungslüftung vorherrscht. Aber die Querlüftung lässt sich nur erzielen, wenn ein Raum beidseitig mit Fenstern ausgestattet ist, was sehr selten der Fall ist. Das Öffnen einer Tür wird oft als Querlüftung hingestellt, aber das ist falsch. Laut dem Stand der Forschung der Lüftungstechnik sollten die Türen auch nicht geöffnet werden, da dann die Schadstoffe unkontrolliert in andere Gebäudeteile gelangen können [4]. Aufgrund der Gefährlichkeit des SARS-CoV-2 Virus werden von anderen Wissenschaftlern Luftwechselraten von mindestens 6 oder sogar 8 gefordert [7].

Es ist sinnvoll sich klar zu machen, was das Lüftungskonzept des UBA bedeutet. Wird eine Schulstunde von 45 Minuten Dauer betrachtet und angenommen, dass nach 20 Minuten für 3-5 Minuten gelüftet wird, dann bedeutet dies, dass über nahezu 90% der Schulstunde keine Lüftung erfolgt und damit die Virenlast im Raum ansteigt, wenn sich eine oder mehrere infizierte Personen in dem Raum befinden. Wie gut die Abnahme der Virenlast während des Stoßlüftens erfolgt, hängt von der Anzahl und Größe der Fenster, dem Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen und von den Windverhältnissen außerhalb des Gebäudes ab. Abbildung 1 verdeutlicht die Zusammenhänge. Wird über eine Schulstunde hinweg nicht gelüftet, dann steigt die Virenlast im Raum linear mit der Zeit an (rote Linie). Die Zunahme der Virenkonzentration, also der Anzahl der Viren pro Kubikmeter, ist abhängig von der Stärke der Quelle, also der Anzahl der freigesetzten Viren pro Zeiteinheit (N_{Quelle}). Darüber hinaus hängt die Zunahme der Virenkonzentration von der Raumgröße V_{Raum} ab. Je größer der Raum ist, umso länger dauert es, bis eine bestimmte Virenlast erreicht ist. Mathematisch lässt sich das durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\text{Virenlast} = \frac{N_{\text{Quelle}}}{V_{\text{Raum}}} \times t$$

Wichtig in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung ist die während der Schulstunde eingeatmete Virenanzahl. Diese ergibt sich aus dem Integral über dem Atemvolumenstrom multipliziert mit der Virenlast über dem betrachteten Zeitraum. Bei konstant angenommenem Atemvolumenstrom ist dies gleich dem Atemvolumenstrom multipliziert mit der mittleren Virenlast des betrachteten Zeitraums. Die rot gestrichelte Linie verdeutlicht den Mittelwert, der sich aus dem entsprechenden Verlauf ergibt.

Geht man nun davon aus, dass nach 20 Minuten alle Fenster im Klassenraum für 3–5 Minuten geöffnet werden und alle Viren in dieser Zeit den Raum durch das Fenster verlassen, dann ergibt sich der blau dargestellte Verlauf (durchgezogene Linie). D.h. nach dem Lüftungsvorgang steigt die Virenlast wieder an. Die Virenlast über der Zeit kann auf diese Weise maximal um 50% reduziert werden (blau gestrichelte Linie). In der Praxis wird es aber nicht möglich sein innerhalb von 3–5 Minuten alle Viren aus dem Raum zu entfernen. In der Regel wird die Abnahme der Virenkonzentration deutlich geringer ausfallen, wie durch die Lila Linien dargestellt. Dies liegt zum einen daran, dass nicht alle Fenster geöffnet werden oder zu kurz geöffnet werden, da es ansonsten im Raum zu kalt wird. Auch wenn viele Fenster über einen langen Zeitraum geöffnet werden, so werden häufig Temperatur- und Windverhältnisse einen Luftaustausch von 100% nicht ermöglichen [4, 8]. Die tatsächliche mittlere Virenlast wird mit der Stoßlüftung folglich stets zwischen 50% und 100% von dem Referenzfall ohne Lüftung betragen.

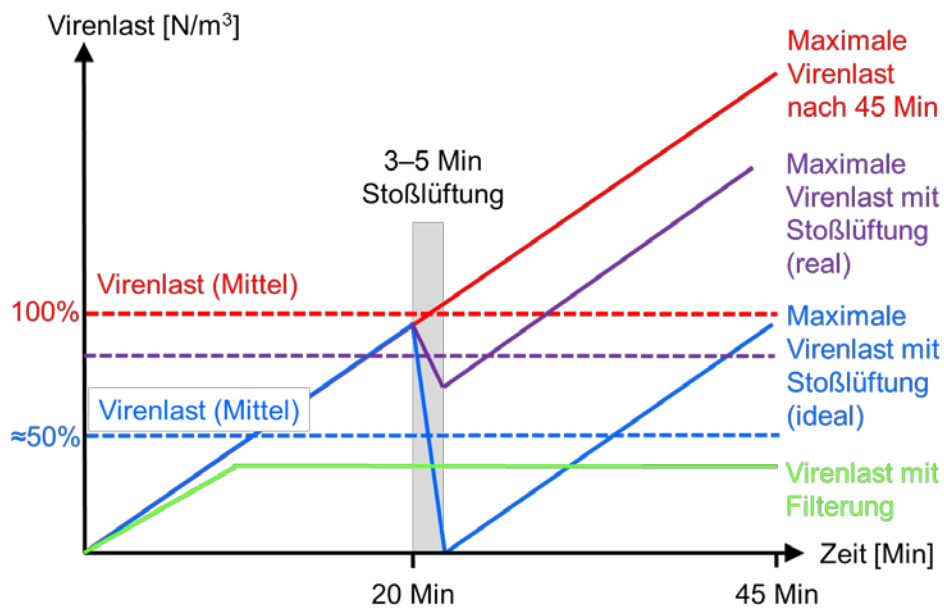


Abbildung 1. Anstieg der Virenlast im Raum ohne Maßnahmen (rot), mit idealer (blau) und realer (lila) Fensterlüftung und mit maschineller Filtertechnologie (grün) nach [9]

Der Vorzug der technischen Abscheidung der Viren mit Hilfe von mobilen Luftreinigern besteht darin, dass mit dieser Methode eine kontinuierliche Entfernung der Viren aus der Raumluft erfolgt. Ferner ist die Abscheidung der Viren unabhängig davon, ob die Menschen lüften können oder wollen und auch die Anzahl und Größe der Fenster und die Temperatur- und Windverhältnisse spielen keine Rolle. Daher lässt sich bei entsprechendem Volumenstrom die Virenlast bei Vorhandensein von Quellen auf einem konstant niedrigen Niveau halten, wie durch die grüne Linie in Abbildung 1 veranschaulicht.

Es wird oft behauptet, dass ein wesentlicher Nachteil der mobilen Luftreiniger darin besteht, dass sie nicht in der Lage seien das CO₂ aus dem Raum zu bringen. Abgesehen davon, dass es mobile Geräte gibt, die das können [10], stellt sich die Frage, warum von einem Gerät, das vor potenziell tödlichen Viren schützen sollen, gefordert wird, dass es gleichzeitig auch ein ungefährliches Gas aus dem Raum schaffen soll. Von der freien Lüftung wird auch nicht verlangt, dass sie die Temperatur im Raum nicht absenken soll, damit Energie gespart wird und die Kinder und Jugendlichen nicht frieren und es in dem Raum behaglich bleibt. Es wird auch nicht gefordert, dass die Fensterlüftung den Unterricht nicht unterbrechen darf, oder dass durch das geöffnete Fenster keine Feinstäube, Pollen und Lärm in den Raum eintreten sollen.

Die intensive mediale Debatte um das richtige Lüftungskonzept in Schulen hat inzwischen dazu geführt, dass vielfach angenommen wird, dass eine hinreichend schnelle Entfernung der Viren aus der Raumluft ausreicht, um für Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion zu sorgen. Es ist aber zu berücksichtigen, dass die freie Lüftung über Fenster, RLT Anlagen und mobile Luftreiniger nur das indirekte Infektionsrisiko reduzieren können, d.h. die Infektion durch die hohe Virenlast im Raum. Gegen das direkte Infektionsrisiko, d.h. die unmittelbare Aufnahme von Viren aufgrund kurzer Abstände zu infizierten Personen oder ungenügendem Schutz durch eine partikelfiltrierende FFP2/FFP3 Maske oder Schutzwände, kann die Lüftung, egal welcher Art, nicht schützen. Dass sich ausreichende Abstände in Klassenzimmern oft nicht realisieren lassen (evtl. mit der Ausnahme des Wechselunterrichts) und FFP2/FFP3 Masken nicht von allen Schülern dauerhaft getragen werden können, wurde in einer Studie untersucht, ob transparente Schutzwände mit umlaufender Kante die Filterwirkung in Klassenräumen beeinträchtigen [7]. Das Ergebnis der Studie verdeutlicht, dass die Entfernung der Aerosolpartikel aus der

Raumluft nicht davon abhängig ist, ob der Raum mit Tischen und Stühlen, zusätzlichen Personen mit Taschen und Laptops und Schutzwänden zwischen den Personen ausgestattet ist. Das ist physikalisch verständlich, da es sich bei der Fensterlüftung und der Nutzung von mobilen Luftreinigern um die Mischlüftung handelt. D.h. die natürlichen Strömungsbewegungen im Raum, verursacht durch die Bewegung, Atmung und Wärmeabgabe der Personen, Temperaturunterschieden in den verschiedenen Raumbereichen und Strömungsbewegungen aufgrund von offenen Fenstern oder mobilen Luftreinigern, sorgen für eine ständige Durchmischung der Luftmassen [1, 4, 11]. Aus diesem Grund werden auch alle Raumbereiche recht gleichmäßig von der Virenlast befreit, unabhängig davon wo die Fenster oder die mobilen Luftreiniger positioniert sind [5]. Je größer die Durchmischung, desto besser ist auch die Reinigungsleistung in weit entfernten Bereichen. Daher sind alle Bedenken, dass umhergehende Personen die Filterleistung reduzieren könnten, physikalisch falsch. Es ist auch falsch, dass Schutzwände zwischen Sitznachbarn an einem Tisch die Belüftung von Klassenzimmern beeinträchtigen würden, wie in [12] unterstellt. Diese Unterstellungen beruhen auf einer falschen Vorstellung von der Mischlüftung und nicht validierten Simulationsergebnissen, die solche Situationen nicht korrekt nachbilden können [1, 4, 13].

Das in [7] vorgestellte und experimentell validierte Schutzkonzept wird zunehmend in Schulen etabliert und inzwischen gibt es ganze Regionen und Städte, die zum Schutz der Kinder und Jugendlichen auf dieses Schutzkonzept setzen. Im Hinblick auf das Schweizer Käsemodell der Pandemie [14] ist diese Umsetzung des Schutzkonzeptes als sehr sinnvoll zu erachten, da es einen wirksamen Baustein zur Verhinderung von Infektionen darstellt. Insbesondere im Hinblick auf zukünftige Virusvarianten, deren Ausbreitung aufgrund von Mutationen schwerer beherrscht werden kann, ist die Nutzung weiterer Schutzvorkehrungen zwingend erforderlich, um ein exponentielles Wachstum der Infektionszahlen zu verhindern. Oft wird die Frage gestellt, wie wirksam das in [7] vorgestellte Schutzkonzept in unterschiedlichen Räumen einer Schule ist. Um diese Frage zu beantworten wurden Experimente im Obermenzinger Gymnasium durchgeführt. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Räume analysiert. Im Folgenden werden die Versuche und die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

2. Messaufbau und Datenanalyse

Da die Wirksamkeit des Schutzkonzeptes in normalen Klassenräumen mit rechteckigem Grundriss und typischer Tischanordnung bereits belegt ist [7] wurden in dieser Studie ein Computerraum mit U-förmiger Tischplatzierung an der Wand, ein Lehrerzimmer mit verteilten Tischen, ein Klassenraum mit Satteldach und eine Mensa mit angeschlossener Küche analysiert. Die Abbildungen 2–5 zeigen schematisch die Draufsicht der Räume mit der Raumausstattung und der Position des Messgerätes und des Raumluftreinigers. Der Abstand zwischen Messgerät und Raumluftreiniger wurde in allen Fällen möglichst groß gewählt, um jeweils die ungünstigsten Verhältnisse zu analysieren.

Für die Bestimmung der Reinigungseffizienz wurden vor Beginn der Messung künstlich erzeugte Aerosolpartikel aus DEHS (mittlerer Durchmesser ca. $0,4 \mu\text{m}$) in den jeweiligen Raum eingebracht und homogen verteilt. Die Größe dieser Partikel liegt in dem Bereich der von infizierten Menschen emittierten und mit Viren belasteten Partikel. Die Partikel folgen der Strömung im Raum nahezu ideal und weisen in dem betrachteten Zeitraum keine merkliche Verdunstung auf. Die Abscheidung der Aerosolpartikel wurde mit einem TROTEC TAC V+ realisiert. Der Volumenstrom wurde so eingestellt, dass sich mindestens eine theoretische Luftwechselrate von $k_{\text{theo}} > 6$ ergibt ($k_{\text{theo}} = 8$ in Raum A; $k_{\text{theo}} = 7,5$ in Raum B; $k_{\text{theo}} = 7$ in Raum C; $k_{\text{theo}} = 8,7$ in Raum D). Die theoretische Luftwechselrate ergibt sich aus dem Verhältnis des

Raumluftreiniger-Volumenstroms zum Raumvolumen. Der zeitliche Verlauf der Partikelkonzentration wurde mithilfe eines *Palas Promo 3000* Partikelzählers mit *Welas 2300* Sensorkopf erfasst.

PC Raum

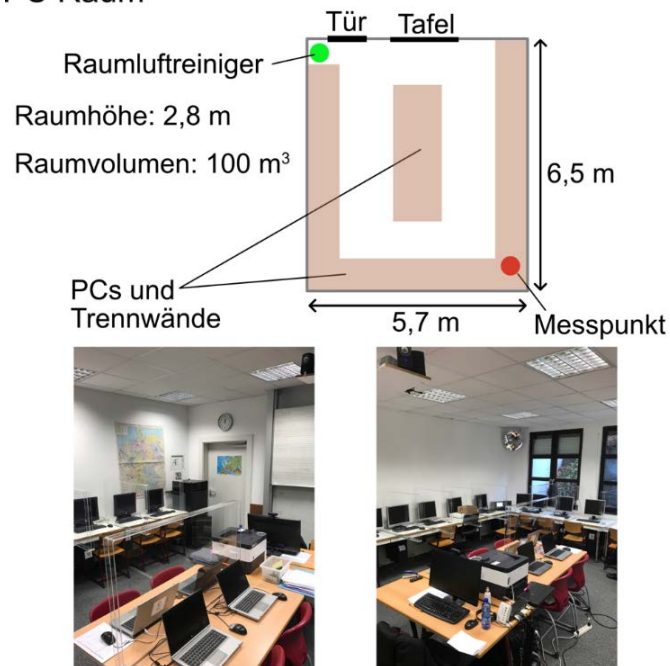


Abbildung 2: Raum A – PC Raum.

Lehrerzimmer

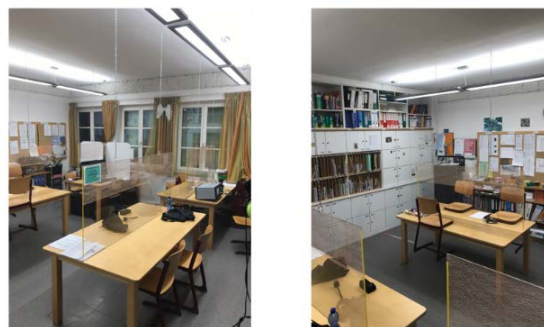
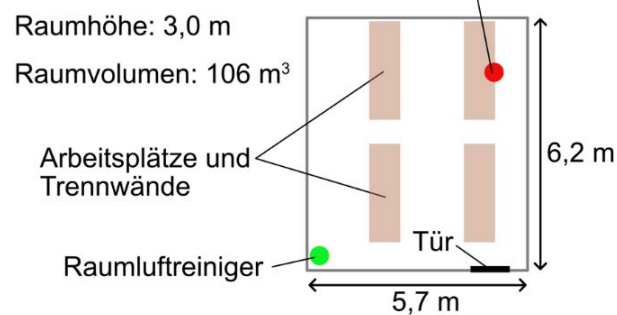


Abbildung 3: Raum B – Lehrerzimmer.

Klassenzimmer Dach

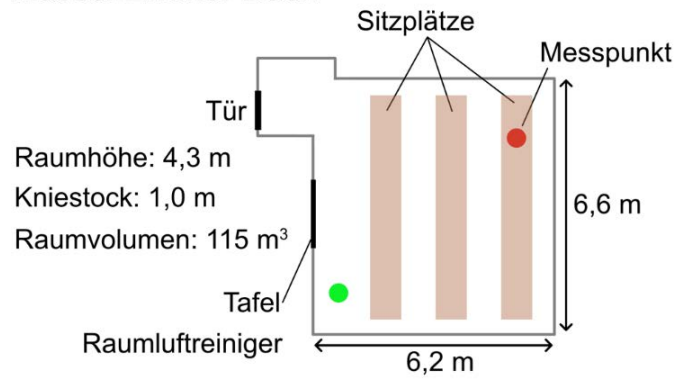


Abbildung 4: Raum C – Klassenzimmer Dach.

Mensa

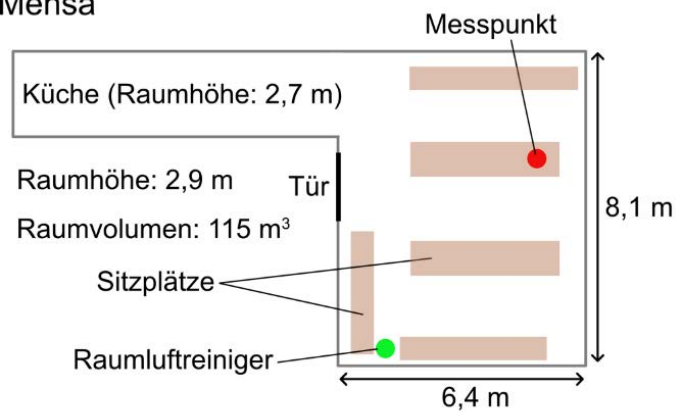


Abbildung 5: Raum D – Mensa.

3. Messergebnisse

Die gemessenen, normierten Partikelkonzentrationen über der Zeit sind in Abbildung 6 dargestellt. Vor jeder Messung mit laufendem Luftreiniger wurden zunächst Referenzmessungen bei ausgeschaltetem Luftreiniger durchgeführt. Dies ist notwendig um zu ermitteln, wie viele Aerosolpartikel den Raum durch Undichtigkeiten verlassen oder sich an den Wänden absetzen. Der jeweilige Verlauf zeigt, dass die Räume A – C insgesamt recht dicht sind. Raum D hingegen zeigt bereits eine recht große Abnahme der Aerosolpartikel ohne Luftreiniger. Diese Abnahme wird durch den Betrieb von Abluftanlagen in der Küche und einer offenen Tür im Essbereich zum Flur verursacht. Diese Konfiguration wurde für die Messung gewählt, da sie exakt der Konfiguration entspricht, die im realen Schulbetrieb vorliegt. Wird der Luftreiniger betrieben, so ergibt sich in allen Räumen eine recht schnelle Abnahme der Aerosolpartikelkonzentration.

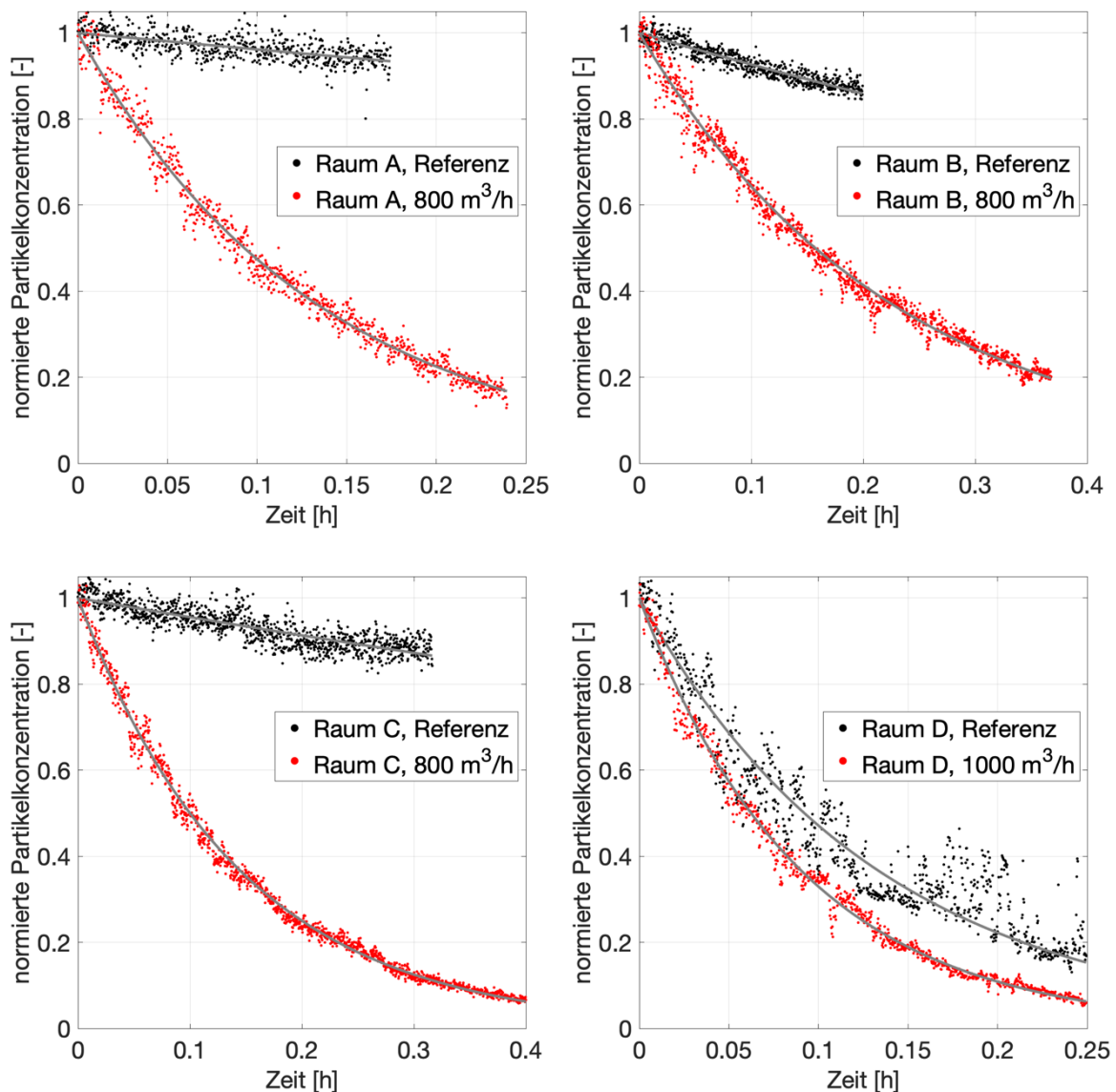


Abbildung 6: Normierte Partikelkonzentrationen über der Zeit für die 4 vermessenen Räume.

Aus den gemessenen Partikelkonzentrationen über der Zeit wird die Abklingrate k mit der Einheit $[1/h]$ bestimmt. Diese ist in der Lüftungstechnik auch als Luftwechsel, Luftwechselzahl oder Luftwechselrate bekannt. Mithilfe von k kann die zeitliche Entwicklung der Partikelkonzentration

c bestimmt werden, sofern das Raumvolumen V [m³] und die Stärke S [Partikel/h] der Verunreinigungsquelle bekannt sind. Die sich nach längerer Zeit stationär einstellende Konzentration $c_{\text{stationär}}$ kann folgendermaßen berechnen werden:

$$c_{\text{stationär}} = \frac{S}{k \cdot V} \quad (1)$$

Je höher k ist, desto schneller werden potentiell gefährliche Aerosolpartikel entfernt, bzw. desto geringer wird die sich nach längerer Zeit einstellende Konzentration sein. Die für die verschiedenen Räume ermittelten Abklingraten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Für verschiedene Konfigurationen ermittelte Abklingraten.

Konfiguration	Abklingrate k [1/h]
Raum A Referenz	0,4
Raum A 800 m ³ /h	7,5
Raum B Referenz	0,8
Raum B 800 m ³ /h	4,4
Raum C Referenz	0,5
Raum C 800 m ³ /h	6,9
Raum D Referenz	7,5
Raum D 1000 m ³ /h	10,9

Es ist zu erkennen, dass für die Räume A und C eine gute Übereinstimmung der gemessenen Luftwechselrate mit der theoretischen Luftwechselrate vorliegt. In Raum A befand sich der Messsensor in der diagonal gegenüberliegenden Ecke des Raumes direkt zwischen zwei transparenten Schutzwänden. Selbst in dieser ungünstigen Position stimmt die gemessene Filterwirkung gut mit dem theoretischen Wert überein. Daher ist gezeigt, dass die transparenten Schutzwände mit umlaufender Kanten keinen negativen Effekt auf die Filterleistung haben, wie in [12] ohne jeglichen verlässlichen Nachweis behauptet. Das bedeutet auch, dass auch die Fensterlüftung in Kombination mit den transparenten Schutzwänden nicht negativ beeinflusst wird. Physikalisch ist das Ergebnis klar, da es sich in beiden Fällen um eine Mischlüftung handelt, wie eingangs bereits ausgeführt. In Raum B war k geringer als k_{theo} . Der Grund dafür liegt an einer geöffneten Tür zum Flur. Hierdurch wird der effektive Raum vergrößert und der gemessene k Wert verringert. Vom diesem Flur wiederum führt die Eingangstür direkt ins Freie. Für die Messungen wurde diese geschlossen gehalten, im praktischen Betrieb wird diese Tür aber häufig geöffnet und auch eine weitere Tür, die sich im Flur befindet, ist im realen Betrieb nicht immer wie bei den hier durchgeführten Versuchen geschlossen. Hierdurch kommt es im realen Betrieb zu zusätzlichen Lüftungen, wodurch k erhöht wird. Das Ergebnis in Raum D zeigt, dass neben dem Luftreiniger weitere Lüftungsmaßnahmen ergänzend genutzt werden können, um die Abnahme der Virenlast in einem Raum bei Bedarf zu beschleunigen. Die Steigerung des k -Wertes bei Betrieb des Raumluftreinigers fällt allerdings nicht so groß aus, wie theoretisch erwartet. Vermutlich ist dies dadurch zu begründen, dass die ohnehin hohen k -Werte in Verbindung mit der Strömung durch den Raum die Effizienz der Mischlüftung herabsetzen. Dennoch wird auch in diesem Fall die Reinigung unterstützt und somit ist es möglich, eine ineffektive Fensterlüftung oder zu schwache RLT Anlage mit Hilfe von mobilen Raumluftreinigern zu ergänzen oder die Fensterlüftung ganz durch eine technische Lösung zu ersetzen.

4. Fazit

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass sich mit mobilen Luftreinigern in ganz unterschiedlichen Raumsituationen gute Filterleistung ergeben können. Die Bestückung des Raumes mit Tischen und Stühlen, Computern und transparenten Schutzwänden hat keinen nachteiligen Effekt auf die Filterleistung. Daher ist es möglich, sowohl das indirekte Infektionsrisiko in Räumen mit den mobilen Raumluftreinigern und gleichzeitig das viel gefährlichere direkte Infektionsrisiko mittels transparenter Schutzwände mit umlaufender Kante zu reduzieren. Um einen Anstieg der CO₂ Konzentration im Raum zu begegnen, können die Fenster wie in der Vergangenheit ab und zu geöffnet werden. Die Filterwirkung wird dadurch nicht behindert und auch die transparenten Schutzwände haben keinen negativen Effekt auf den CO₂ Austausch, da die Mischlüftung stets wirksam ist. Alternativ können auch Raumluftreiniger verwendet werden, die im Umluftbetrieb die Raumluft filtern und gleichzeitig über einen Bypass Außenluft in den Raum führen. Auf diese Weise lässt sich das Virus und CO₂ Problem gleichzeitig technisch lösen, ohne dass der Unterricht zur Lüftung ständig unterbrochen werden muss. Ein wichtiges Ergebnis der Studie ist auch, dass eine ineffiziente Lüftung durch Fenster, Türen oder Abluftanlagen stets durch mobile Raumluftreiniger verbessert werden kann. Leistungsfähige Raumluftreiniger sind aber auch ohne Fensterlüftung in der Lage, die Virenlast in einem Raum auf einen niedrigen Niveau zu halten, oder eine hohe Virenlast schnell zu reduzieren, da sie im Gegensatz zur Stoßlüftung kontinuierlich für eine Reduktion der Virenlast sorgen und weil die Filterleistung völlig unabhängig davon ist, ob es ausreichend Fenster in den Räumen gibt, die Menschen bereit sind zu Lüften oder die Temperatur- und Windbedingungen einen Luftaustausch überhaupt physikalisch ermöglichen können. Daher sorgen leistungsfähige, mobile Luftreiniger mit Filtern der Klasse H13 oder H14, unabhängig von der Anzahl und Größe der Fenster, dem Wollen oder Können der Menschen und der Physik für eine gleichbleibende Abscheidung der Virenlast im Raum. Es ist daher völlig unverständlich, warum das Umweltbundesamt die Umsetzung des wissenschaftlich belegten Schutzkonzeptes bekämpft. Es gehört sicher nicht zu den Aufgaben des Umweltbundesamtes wirksame Schutzkonzepte zu verhindern.

Anmerkung

Die Untersuchungen wurden durch die Firma TROTEC GmbH, Heinsberg, finanziell unterstützt. Die Untersuchungen wurden unter Einhaltung der guten wissenschaftlichen Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durchgeführt. Die Unterstützung durch die Firma TROTEC hat keinerlei Auswirkung auf die dargestellten Ergebnisse.

Literatur

- [1] Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (2021) Klassenräume besser belüften – Ein Vorschlag. 18.01.2021 <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/aktuell/2021/offener-brief-klassenraeume-besser-belueften-ein-vorschlag>
- [2] Trennscheiben und Lüftung von Räumen zur Eindämmung der Corona-Pandemie. 22.02.2021 https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/physikkonkret/zusatzinfos/quellen_pk56.html
- [3] Umweltbundesamt (2020) Lüften in Schulen: Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu Luftaustausch und effizientem Lüften zur Reduzierung des Infektionsrisikos durch

- virushaltige Aerosole in Schulen vom 15.10.2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/umweltbundesamt_lueften_in_schulen__0.pdf
- [4] Heinz E (2016) Wohnraumlüftung – frei und ventilatorgestützt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
 - [5] Kähler CJ, Fuchs T, Hain R (2020) Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? <https://www.unibw.de/lrt7/raumluftreiniger.pdf> und <https://youtu.be/3Y3KEIUdFFU>
 - [6] Kähler C, Fuchs T, Mutsch B, Hain R (2020) School education during the SARS-CoV-2 pandemic – Which concept is safe, feasible and environmentally sound? medRxiv 2020.10.12.20211219; doi: <https://doi.org/10.1101/2020.10.12.20211219>
 - [7] Bodenschatz E (2021) Analyse der Raumluftreinigung und deren Einfluss auf das Ansteckungsrisiko durch SARSCoV-2 in Klassenräumen. 21.01.2021
 - [8] Kähler CJ, Fuchs T, Hain R (2020) Untersuchungen zur Lüftungssituation in einem Kopfhörsaal des Geb. 033 an der Universität der Bundeswehr München. Forschungsbericht des Instituts für Strömungsmechanik und Aerodynamik der UniBw vom 30.11.2020 https://de.trotec.com/fileadmin/user_upload/bilder/maschinen/luftreinigung/tac-vplus/tac-vplus_nk/studien/Bericht_Trotec_UniBw_033-2431.pdf
 - [9] <https://youtu.be/DzkhRs5LG0I>
 - [10] Kähler CJ, Hain R (2021) Analyse eines Viromed Virosafe 2000/F800 Raumluftreinigers mit Außenluftzuführung in einem 80 m² großen Raum. Forschungsbericht des Instituts für Strömungsmechanik und Aerodynamik der UniBw vom 03.02.2021 https://www.unibw.de/lrt7/bericht_viromed_virosafe_2000-f800.pdf
 - [11] Etheridge D, Sandberg M (1996) Building Ventilation: Theory and Measurement. Wiley ISBN: 978-0-471-96087-4
 - [12] Hygieneplan für die bayerischen Schulen. <https://www.km.bayern.de/ministerium/meldung/7061/aktualisierter-rahmen-hygieneplan-fuer-schulen-liegt-vor.html>. 13.11.2020
 - [13] https://www.unibw.de/lrt7/kommentar_rahmenhygieneplan_schulen.pdf
 - [14] Reason J (2000) Human error: models and management. In: British Medical Journal. Band 320, Nr. 7237, 18. März 2000, S. 768–770, <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>